



东南大学
能源与环境学院
school of energy and environment seu

核反应堆控制及核电站仪控系统

复杂控制系统2 导前微分控制系统





- 串级控制系统的特点分析
- 串级控制系统的应用范围
- 串级控制系统的设计原则
- 串级控制系统的参数整定

- 快速克服二次干扰
- 减小对象时间常数
- 提高系统工作频率
- 有一定自适应能力



- 串级控制系统的特点分析
- 串级控制系统的应用范围
- 串级控制系统的设计原则
- 串级控制系统的参数整定

- 对象控制通道延迟时间长
- 对象时间常数大
- 负荷变化大，对象非线性
- 干扰变化剧烈、幅值大



- 串级控制系统的特点分析
- 串级控制系统的应用范围
- 串级控制系统的设计原则
- 串级控制系统的参数整定

- 副参数选择
- 副回路设计
- 主、副调节器选择



- 串级控制系统的特点分析
- 串级控制系统的应用范围
- 串级控制系统的设计原则
- 串级控制系统的参数整定

- 工作频率接近，逐步逼近法
- 工作频率相差大，两步整定法
- 简化过程，一步整定法

本节学习内容



東南大學
能源与环境学院
seu school of energy and environment

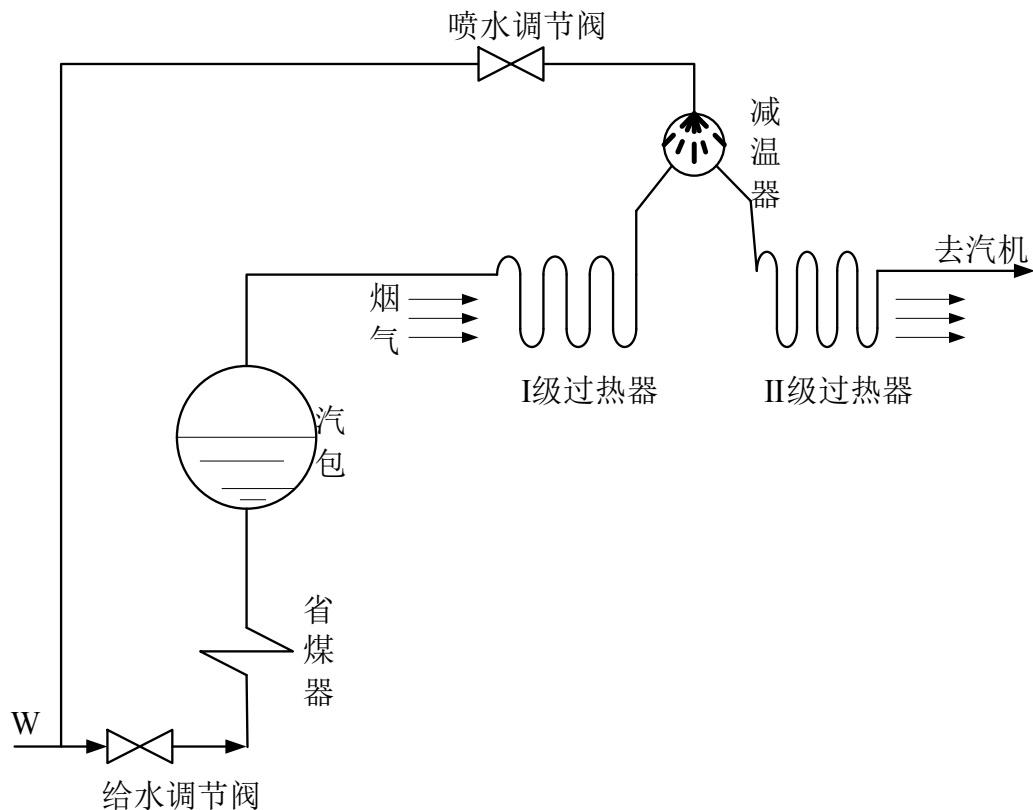
- 导前微分双回路控制系统结构
- 导前微分双回路控制系统分析
- 导前微分双回路控制系统整定

导前微分双回路控制系统结构



东南大学
能源与环境学院
seu school of energy and environment

过热汽温控制的任务和被控对象动态特性



1. 过热蒸汽温度控制的任務:

维持过热器出口蒸汽温度在允许的范围之内，并保护过热器，使其管壁温度不超过允许的工作温度。

如果过热蒸汽温度偏低，则

(1) 降低电厂的工作效率，汽温每降低 5°C ，热经济性将下降约1%；

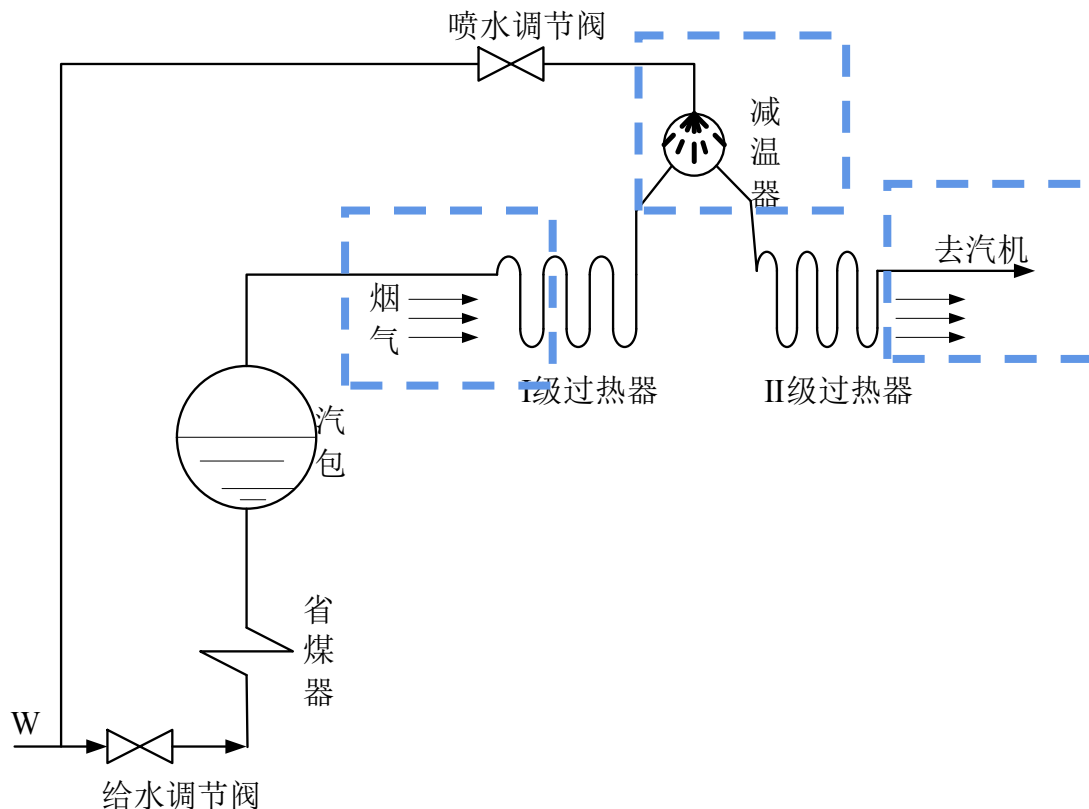
(2) 汽轮机尾部蒸汽湿度升高，甚至使之带水，严重影响汽轮机的安全运行。

导前微分双回路控制系统结构



东南大学
能源与环境学院
seu school of energy and environment

过热汽温控制的任务和被控对象动态特性



2. 过热蒸汽温度控制的对象特性:

影响汽温变化的扰动因素很多，例如蒸汽负荷，烟气温度和流速，给水温度，炉膛热负荷，送风量，给水母管压力和减温水量。

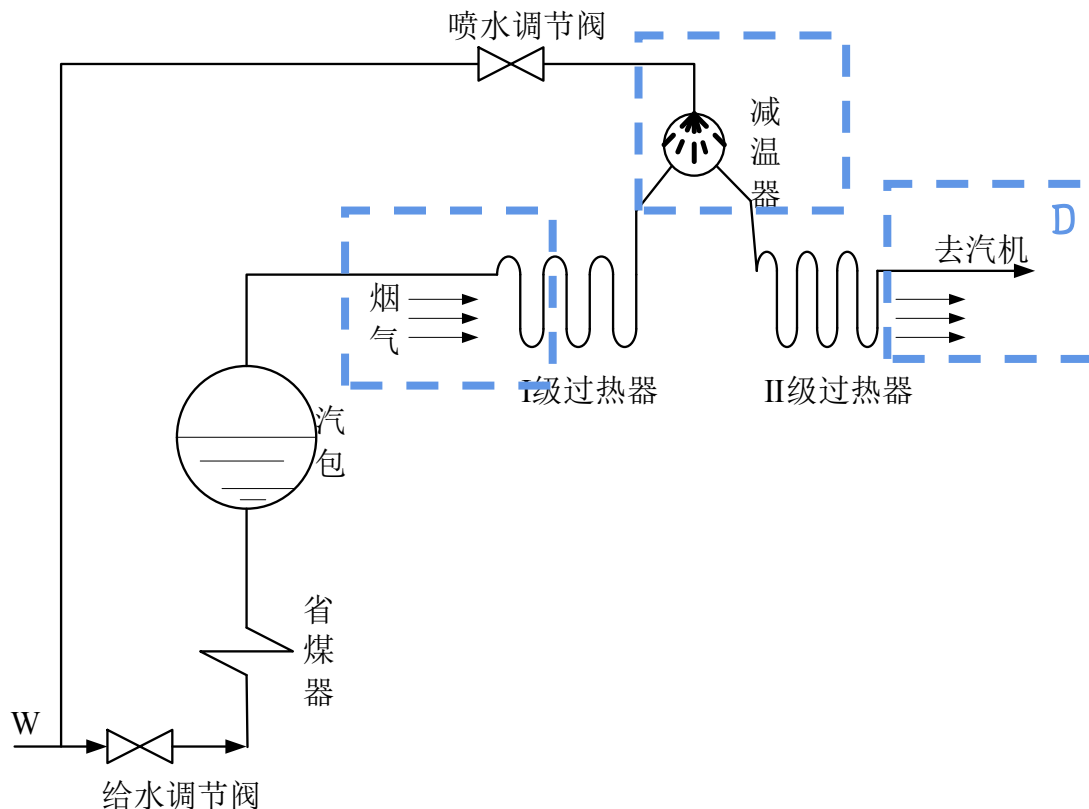
归纳：蒸汽流量，烟气传热量和减温水三个方面的扰动。

导前微分双回路控制系统结构



东南大学
能源与环境学院
seu school of energy and environment

过热汽温控制的任务和被控对象动态特性



2. 过热蒸汽温度控制的对象特性:

扰动因素归纳：蒸汽流量，烟气传热量和减温水三个方面的扰动。

(1) 蒸汽流量扰动 (D)

➤ 引起蒸汽流量扰动的原因有两个:

- 蒸汽母管压力变化
- 汽轮机调速汽门的开度变化

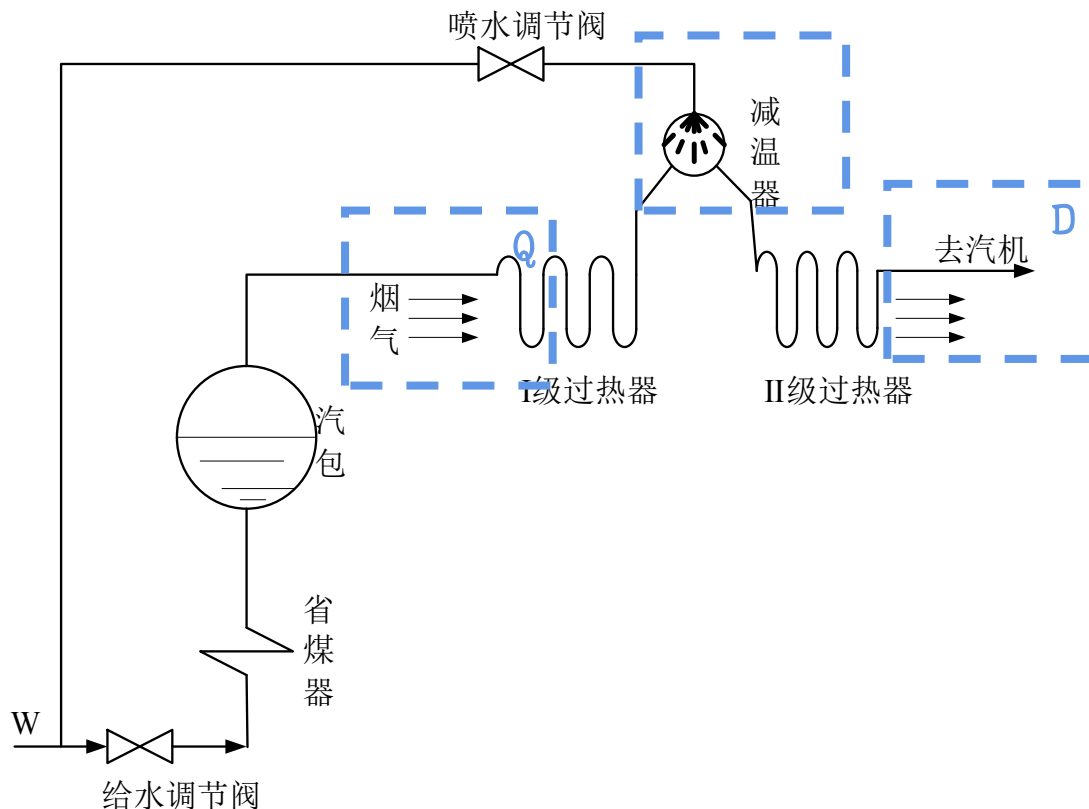
➤ 对象动态特性的特点:

- 温度响应有延迟，有惯性且有自平衡能力
- τ/T_c 值较小，惯性和迟延较小

导前微分双回路控制系统结构



过热汽温控制的任务和被控对象动态特性



2. 过热蒸汽温度控制的对象特性:

扰动因素归纳：蒸汽流量，烟气传热量和减温水三个方面的扰动。

(2) 烟气侧传热量的扰动 (Q)

➤ 烟气传热量扰动引起的**原因**很多:

给粉机给粉不均匀；蒸发受热面结渣；汽包给水温度变化；燃烧火焰中心位置的改变等。

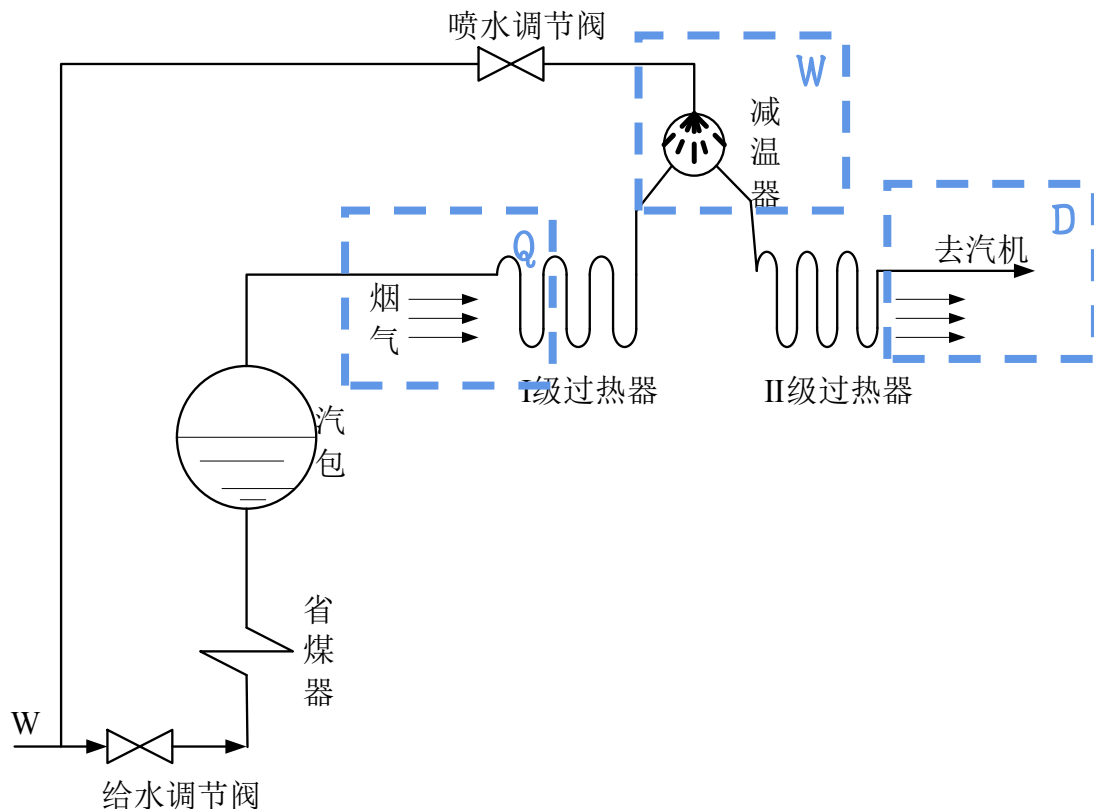
➤ 对象动态特性的总**特点**：

- 有延迟，有惯性，有自平衡能力
- 惯性和迟延较小（与蒸汽流量扰动类似）

导前微分双回路控制系统结构



过热汽温控制的任务和被控对象动态特性



2. 过热蒸汽温度控制的对象特性:

扰动因素归纳：蒸汽流量，烟气传热量和减温水三个方面的扰动。

(3) 减温器喷水量扰动 (W)

➤ 对象动态特性的总特点：

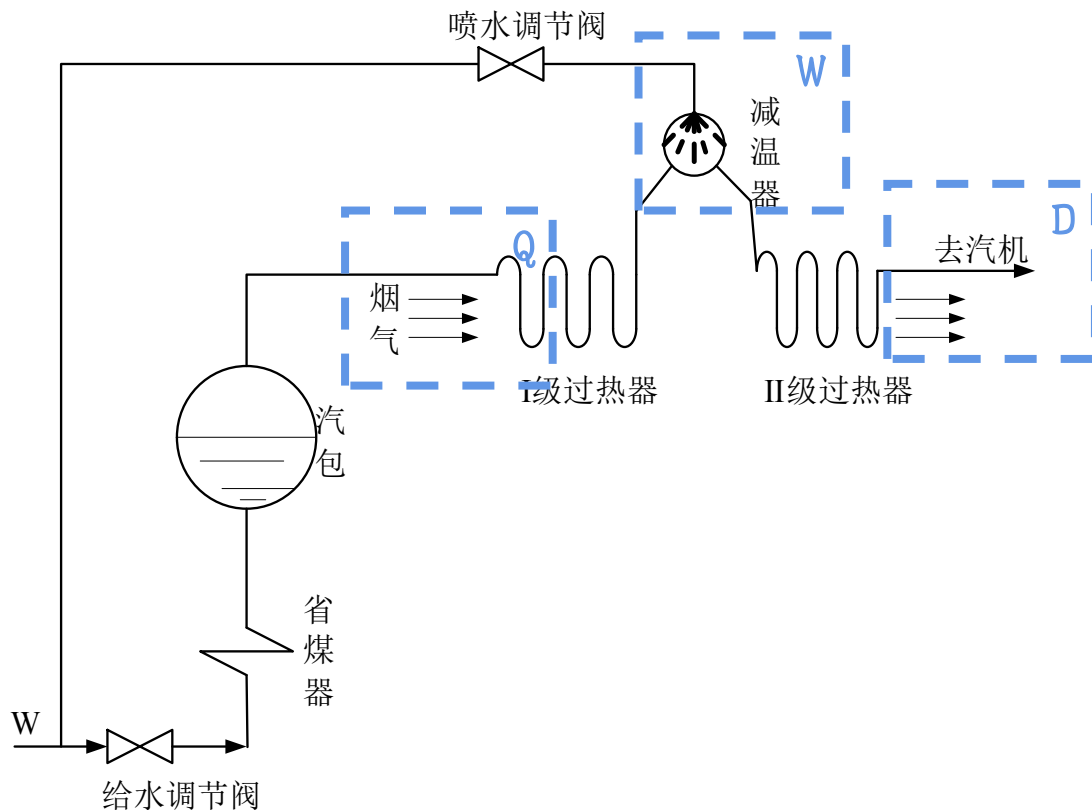
- 有延迟，有惯性，有自平衡能力
- 喷水来控制蒸汽温度，当喷水量发生变化后，需要通过这些串联单容对象，最终引起出口蒸汽温度的变化，有自衡性。因此，响应有很大的延迟。减温器与过热器出口越远，延迟越大。

导前微分双回路控制系统结构

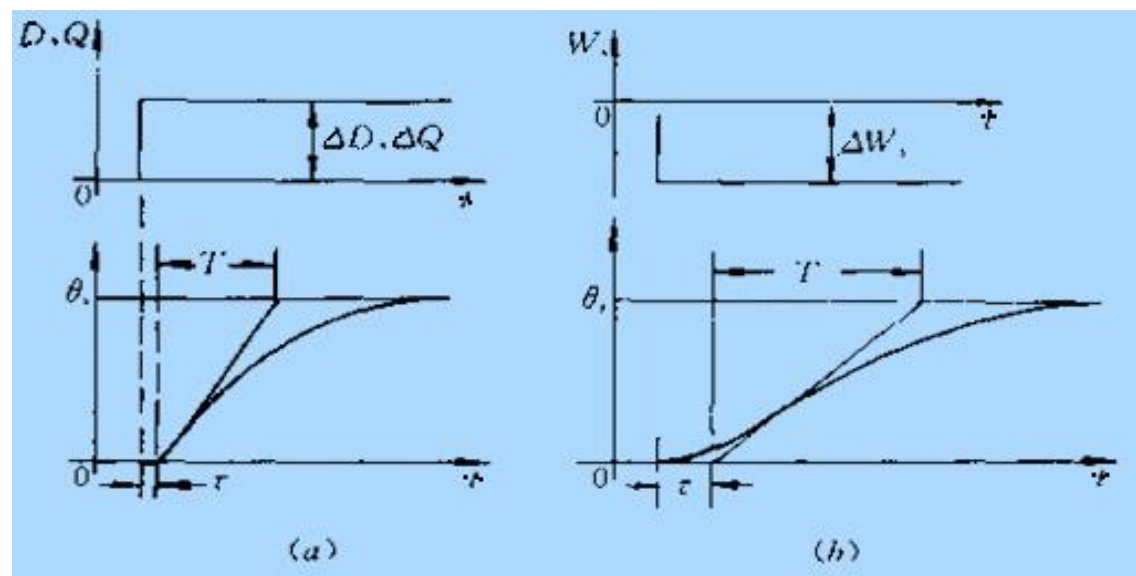


东南大学
能源与环境学院
seu school of energy and environment

过热汽温控制的任务和被控对象动态特性



过热汽温 (θ_1) 对象动态特性响应曲线:



(a) 蒸汽量D或
烟气传热量Q增
加的扰动

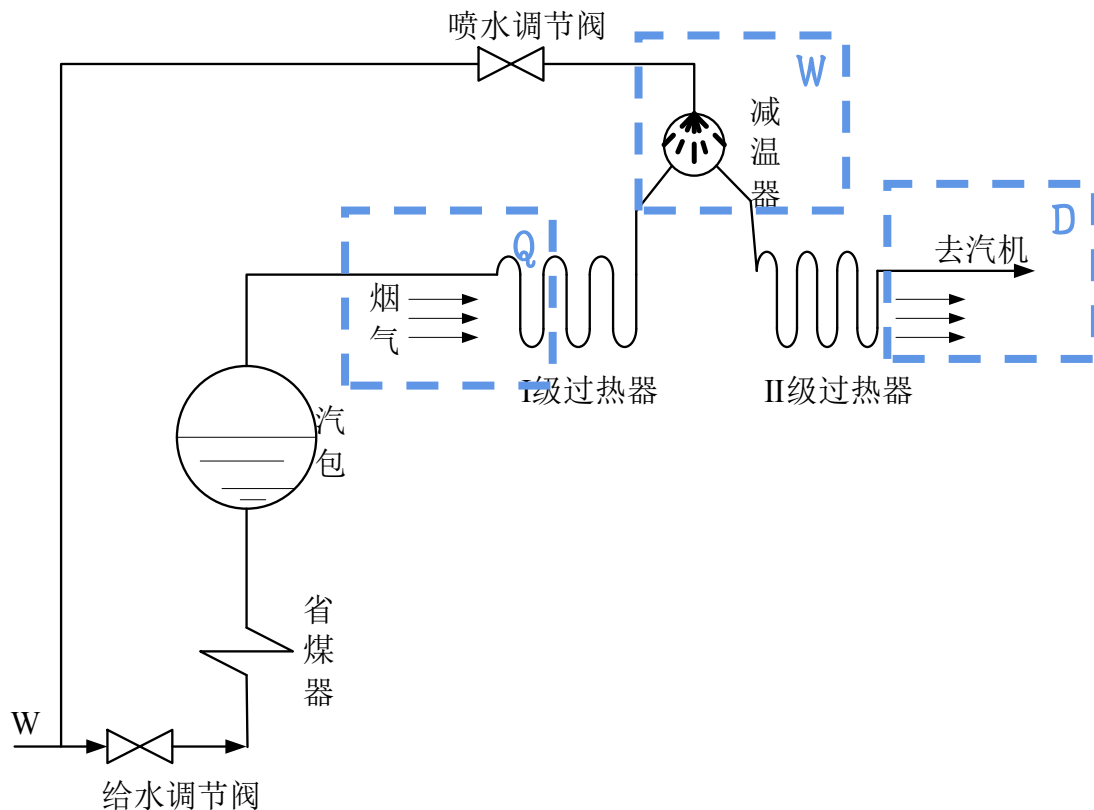
(b) 减温器喷水
量W减少的扰动

导前微分双回路控制系统结构



东南大学
能源与环境学院
seu school of energy and environment

过热汽温控制的任务和被控对象动态特性



小结

➤ 被调量：

- 过热蒸汽出口温度 (θ_1)

➤ 对象动态特性:

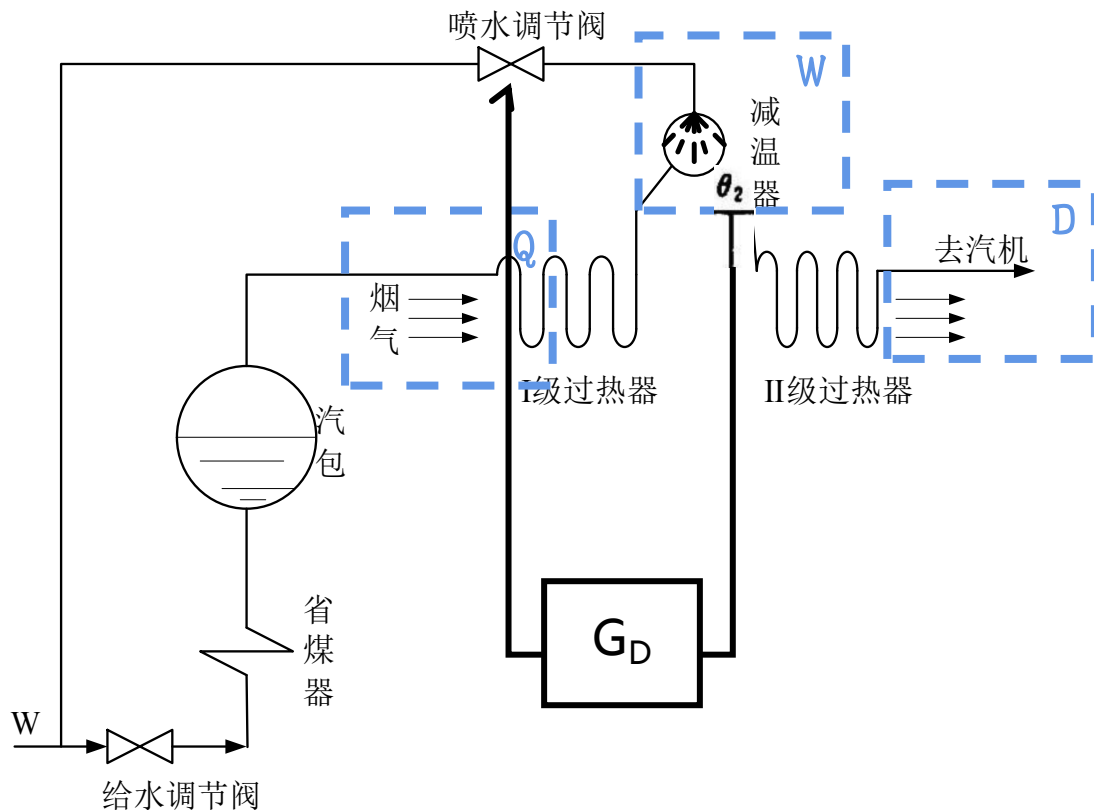
- 有自衡，有惯性，有迟延
- 存在大迟延（减温器喷水量W）

导前微分双回路控制系统结构



东南大学
能源与环境学院
seu school of energy and environment

导前微分双回路过热汽温控制系统



➤ 串级过热蒸汽控制系统

- 副参数：减温器后过热蒸汽温度（ θ_2 ）
- 中间量测量->对W迅速调控

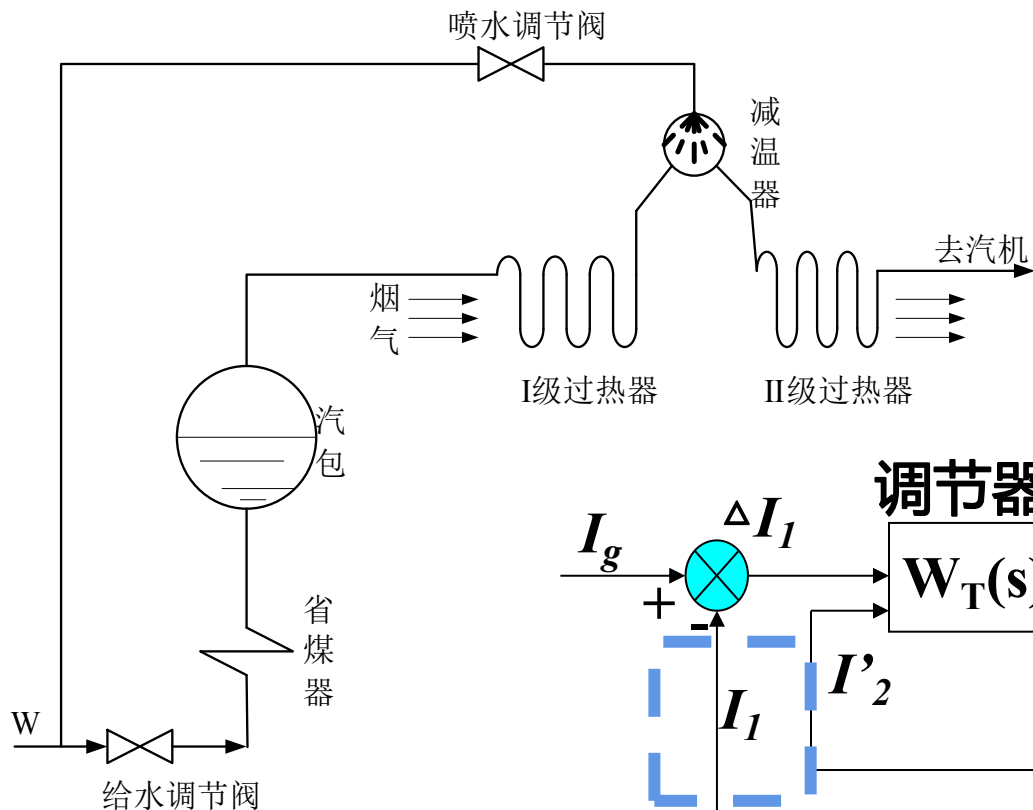
➤ 微分作用:

$$u(t) = T_D \frac{de(t)}{dt}$$

- 反映输出量变化趋势
- 减温器出口引出温度信号，接入微分器

导前微分双回路控制系统结构

导前微分双回路过热汽温控制系统组成



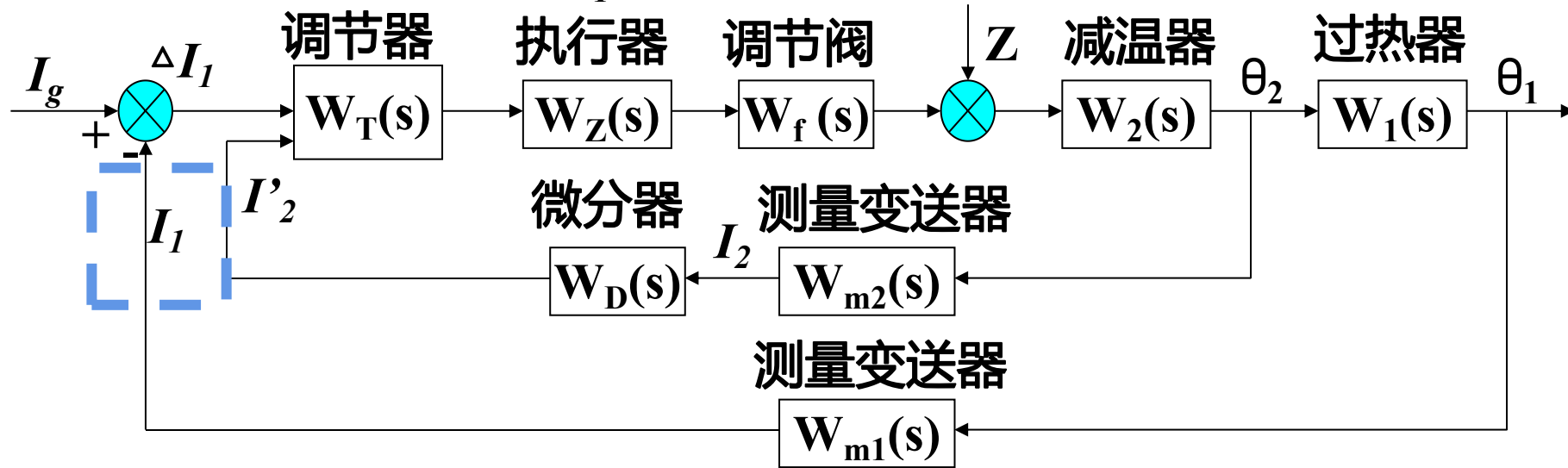
θ_1 : 出口过热蒸汽温度

$W_T(s)$: 温度调节器

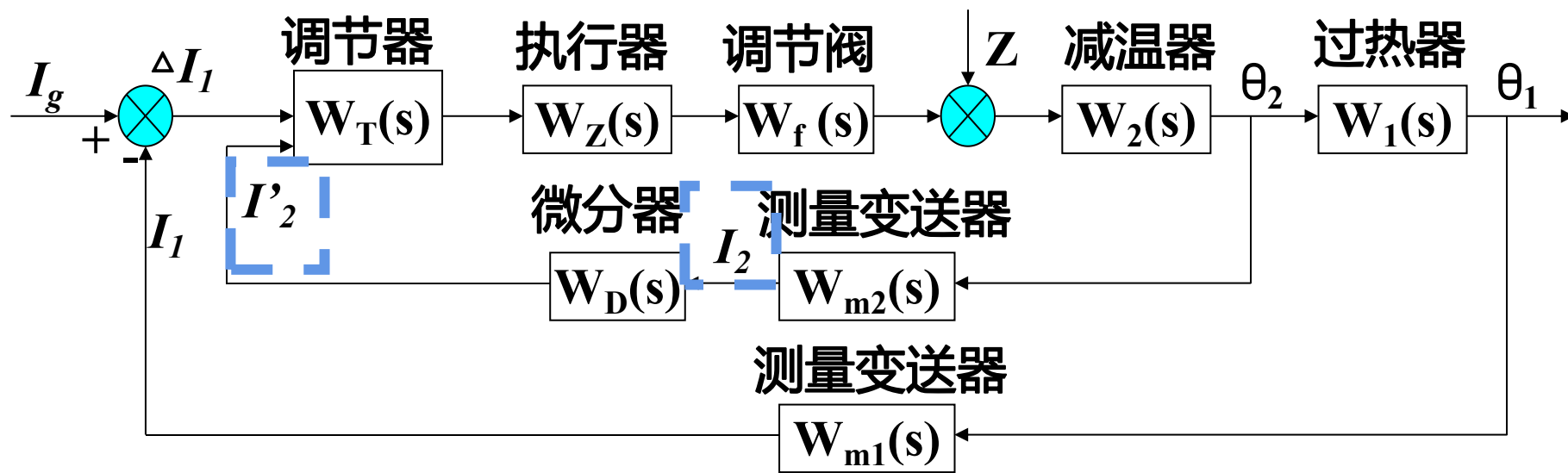
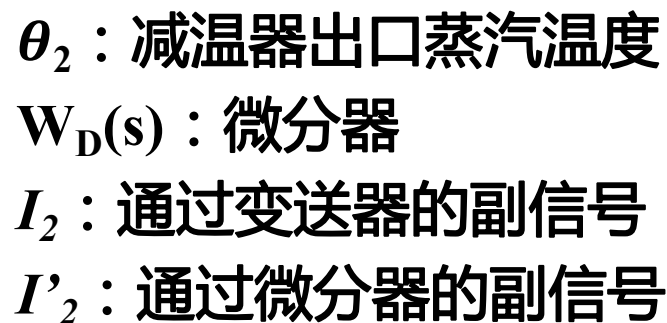
$W_z(s)$ 、 $W_f(s)$ ：执行机构

$W_{m1}(s)$ 、 $W_{m2}(s)$ ：变送器

I_1 ：通过变送器的主信号



导前微分双回路过热汽温控制系统组成

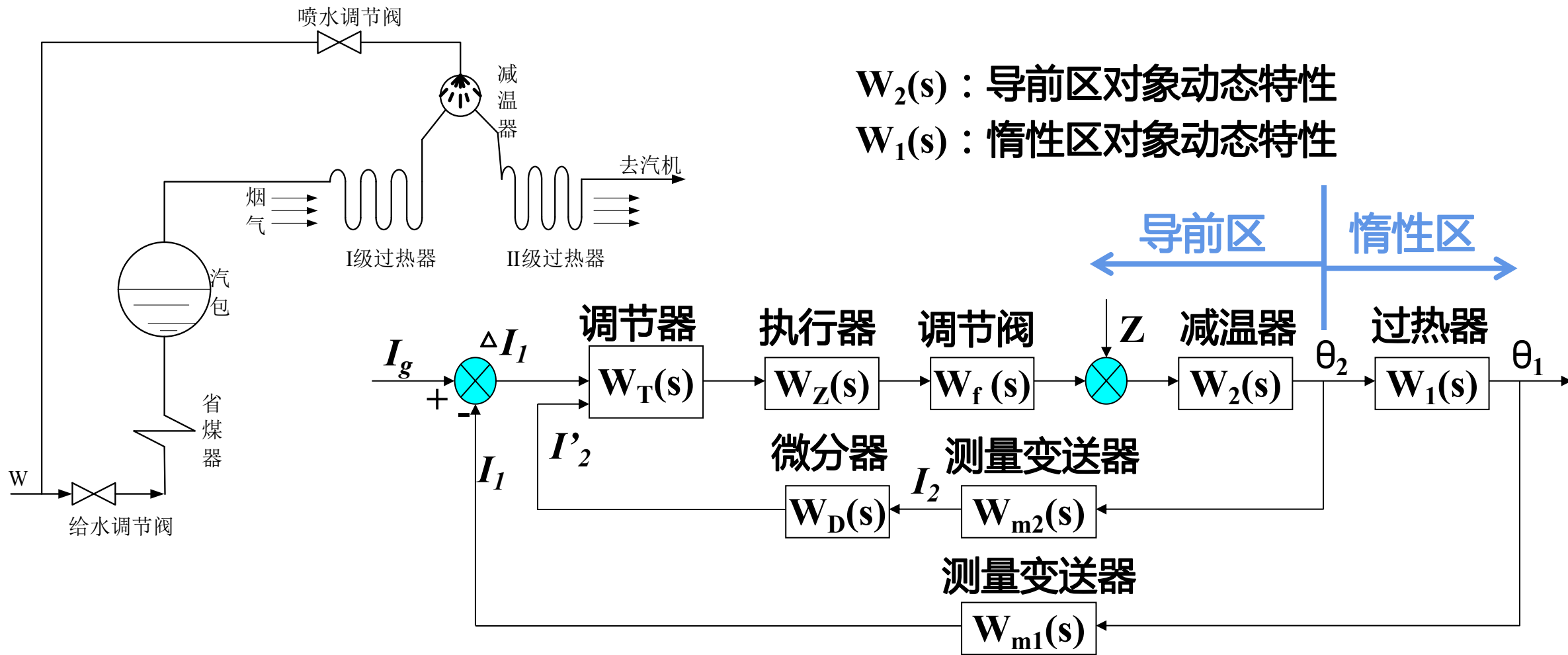


导前微分双回路控制系统结构



东南大学
能源与环境学院
seu school of energy and environment

导前微分双回路过热汽温控制系统组成

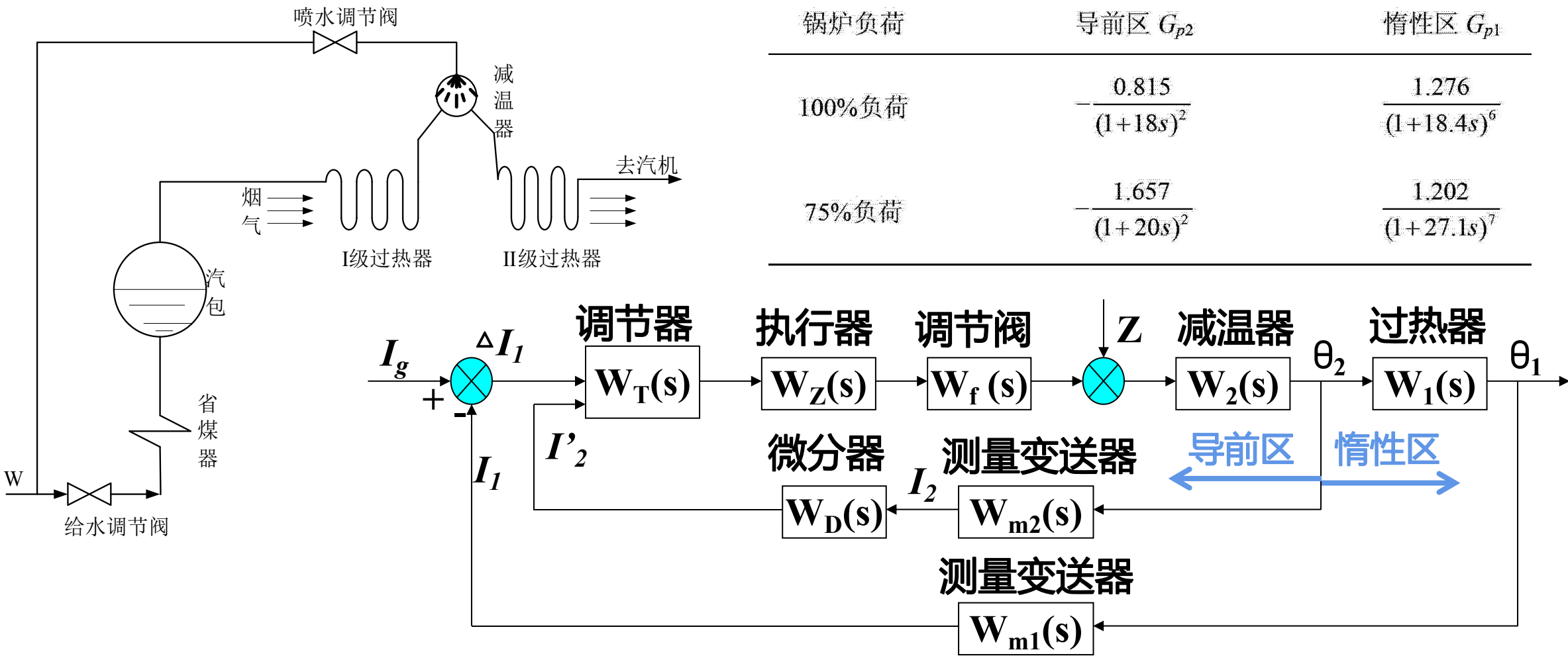


导前微分双回路控制系统结构



东南大学
能源与环境学院
seu school of energy and environment

导前微分双回路过热汽温控制系统组成



导前微分双回路控制系统结构



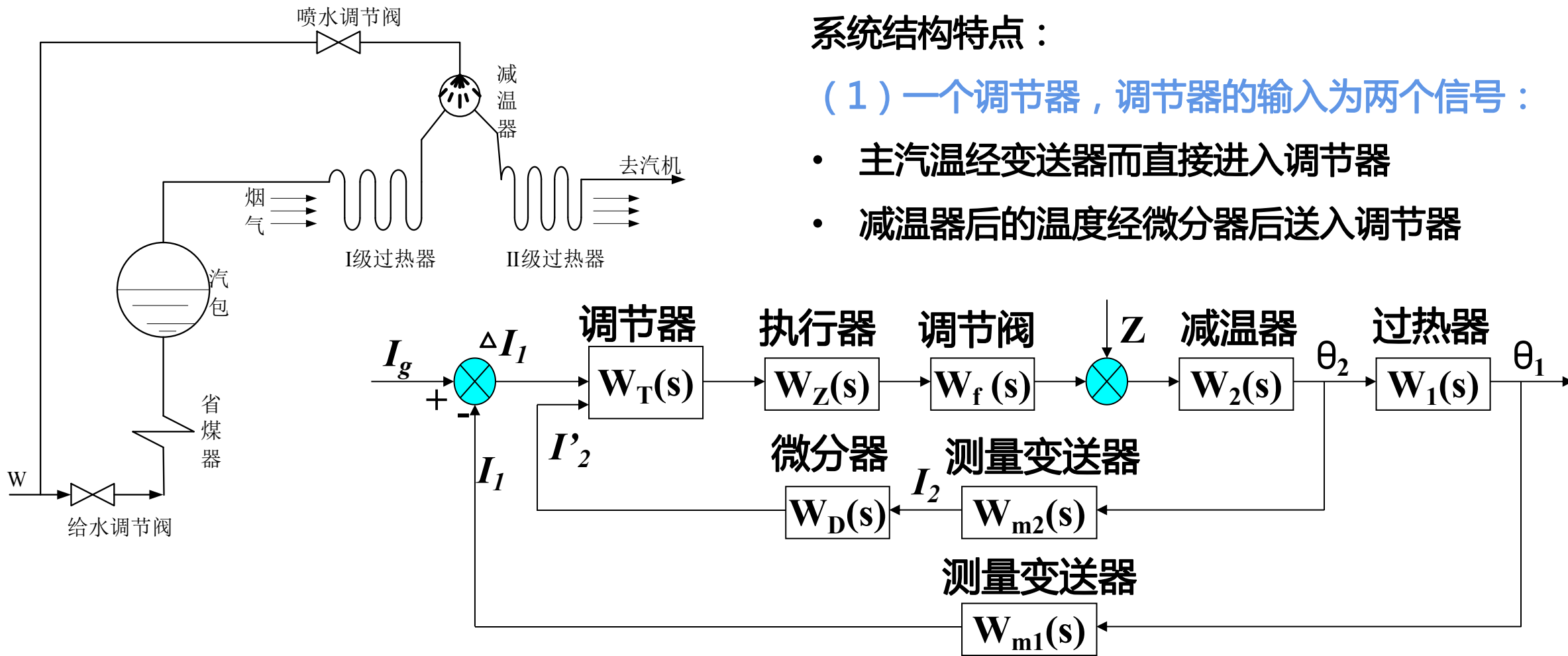
东南大学
能源与环境学院
seu school of energy and environment

导前微分双回路过热汽温控制系统组成

系统结构特点：

(1) 一个调节器，调节器的输入为两个信号：

- 主汽温经变送器而直接进入调节器
- 减温器后的温度经微分器后送入调节器



导前微分双回路控制系统结构



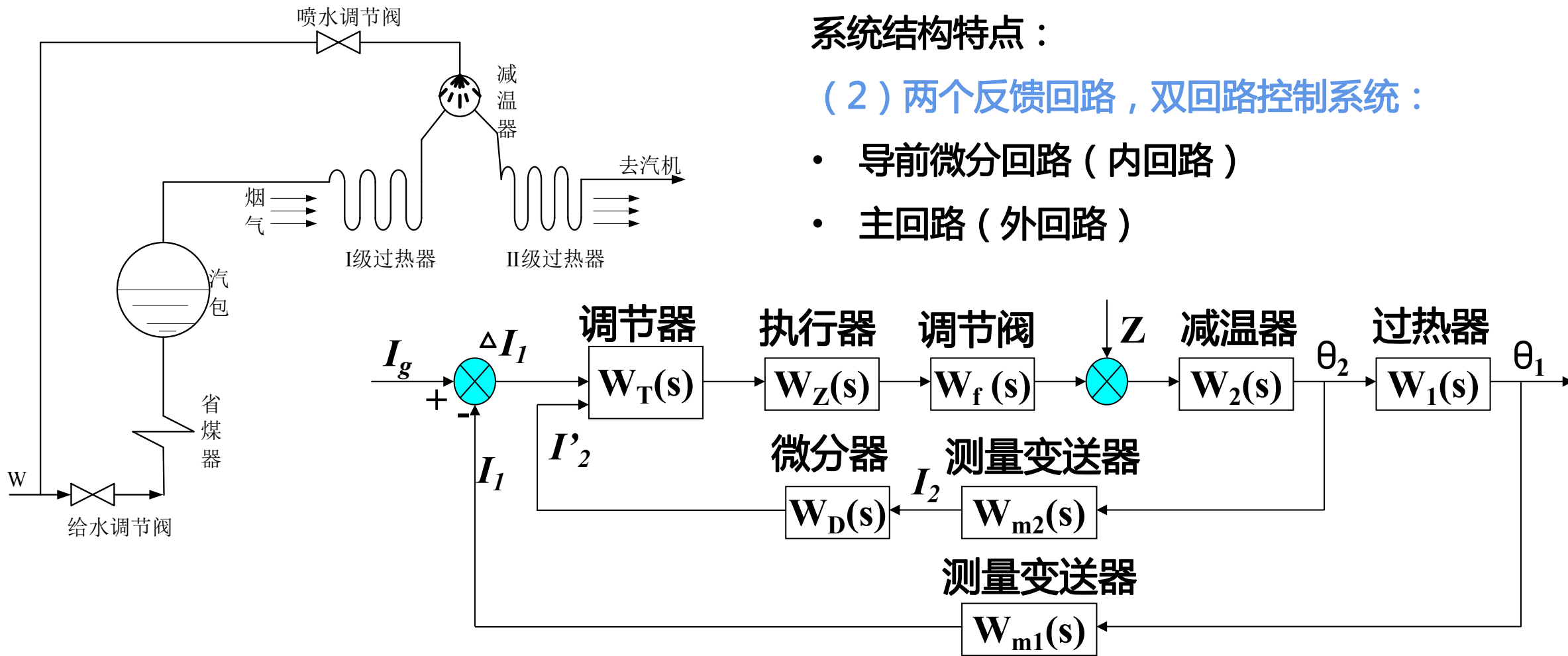
东南大学
能源与环境学院
seu school of energy and environment

导前微分双回路过热汽温控制系统组成

系统结构特点：

(2) 两个反馈回路，双回路控制系统：

- 导前微分回路（内回路）
- 主回路（外回路）



导前微分双回路控制系统结构



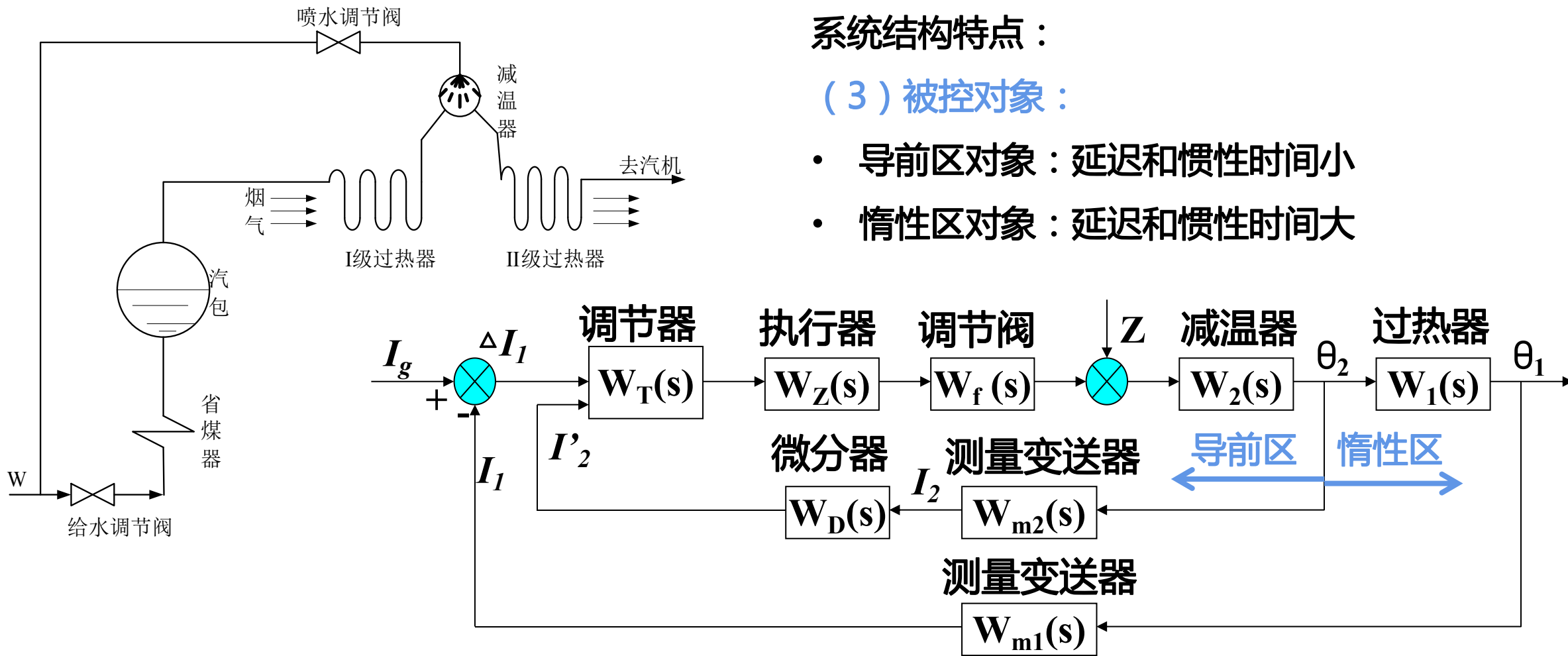
东南大学
能源与环境学院
seu school of energy and environment

导前微分双回路过热汽温控制系统组成

系统结构特点：

(3) 被控对象：

- 导前区对象：延迟和惯性时间小
- 惰性区对象：延迟和惯性时间大



导前微分双回路控制系统分析



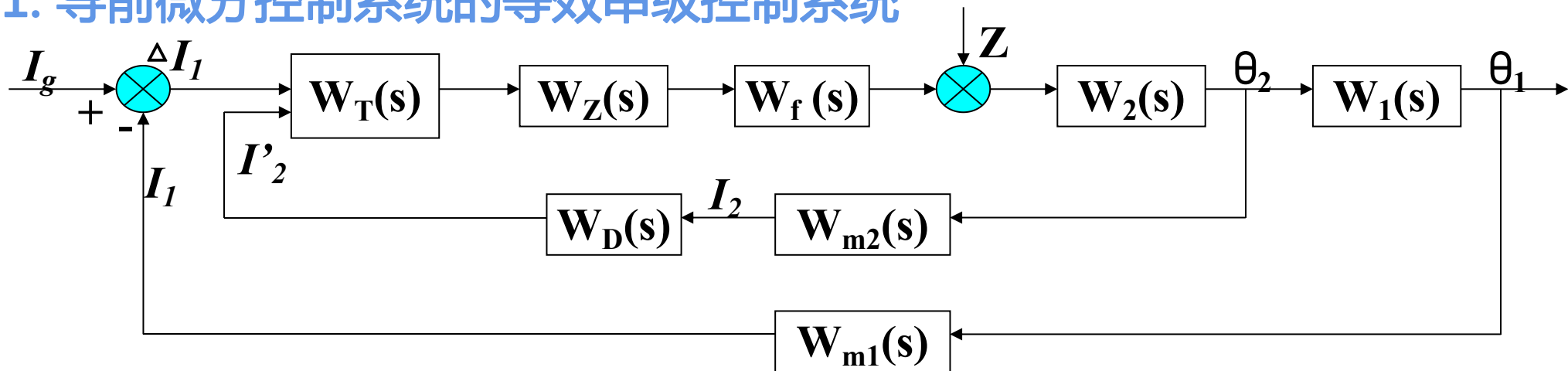
東南大學
能源与环境学院
seu school of energy and environment

1. 将导前微分控制系统等效为串级控制系统
2. 加入导前微分信号改善控制对象动态特性

导前微分双回路控制系统分析

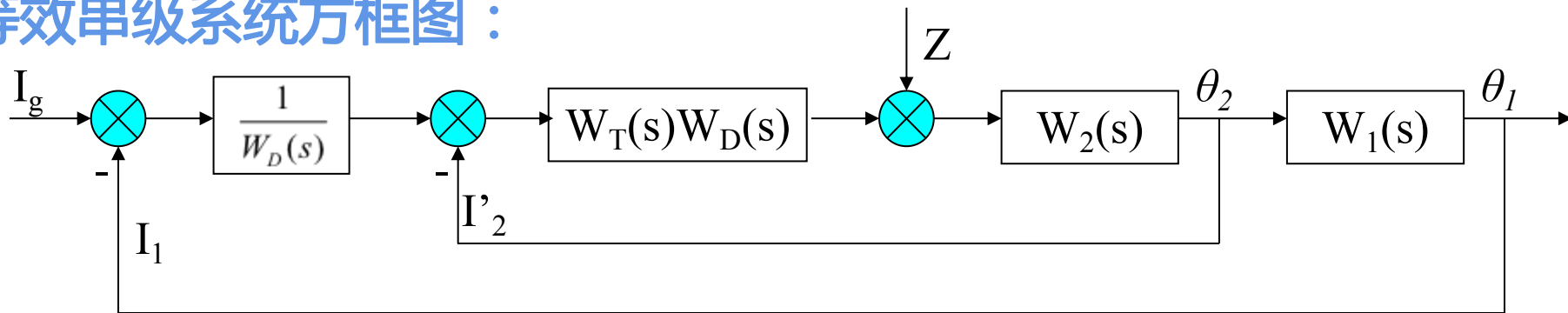


1. 导前微分控制系统的等效串级控制系统



令导前微分系统方框图中的
则其等效串级系统方框图：

$$W_z(s) = W_f(s) = W_{m1}(s) = W_{m2}(s) = 1$$



导前微分双回路控制系统分析



東南大學
能源与环境学院
seu school of energy and environment

1. 导前微分控制系统的等效串级控制系统

等效主、副调节器：

$$W_{T1}(s) = \frac{1}{W_D(s)}$$

调节器为PI规律：

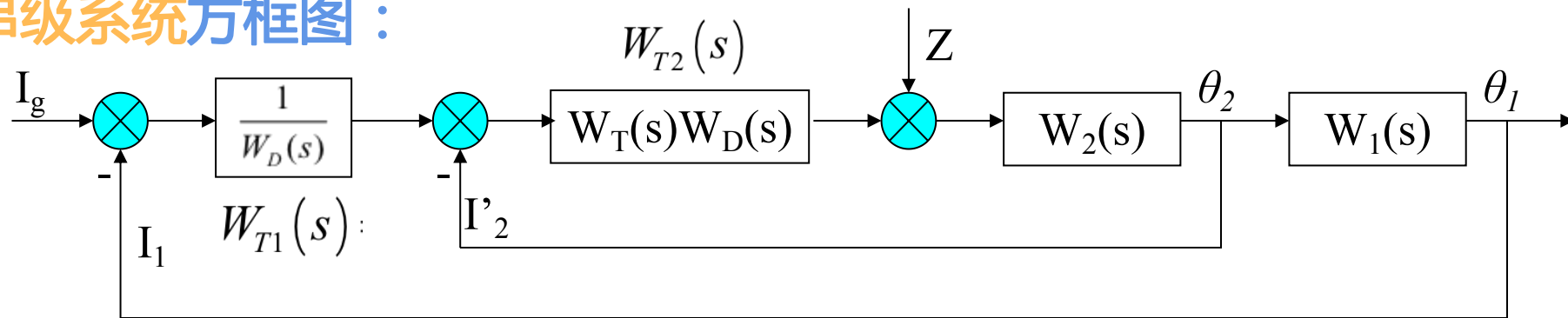
$$W_T(s) = \frac{1}{\delta} \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

$$W_{T2}(s) = W_T(s) \cdot W_D(s)$$

微分器（实际微分）：

$$W_D(s) = (K_D \cdot T_D \cdot s) / (1 + T_D s)$$

等效串级系统方框图：



导前微分双回路控制系统分析



1. 导前微分控制系统的等效串级控制系统

等效主调节器特性：

$$W_{T1}(s) = \frac{1}{W_D(s)} = \frac{1 + T_D s}{K_D \cdot T_D \cdot s} = \frac{1}{K_D} \left(1 + \frac{1}{T_D s} \right) = \frac{1}{\delta_1} \left(1 + \frac{1}{T_{i1} s} \right)$$

等效主调节器有比例积分性质，比例带 K_D ，积分时间 T_D

$$\begin{aligned}\delta_1 &= K_D \\ T_{i1} &= T_D\end{aligned}$$

等效副调节器特性：

$$\begin{aligned}W_{T2}(s) &= W_T(s) \cdot W_D(s) = \frac{1 + T_i s}{\delta T_i s} \cdot \frac{K_D \cdot T_D \cdot s}{1 + T_D s} \\ &= \frac{K_D \cdot T_D}{\delta T_i} \left[\frac{\frac{T_i}{T_D} (1 + T_D s) + 1 - \frac{T_i}{T_D}}{1 + T_D s} \right] = \frac{K_D}{\delta} \left(1 + \frac{\frac{T_D}{T_i} - 1}{1 + T_D s} \right)\end{aligned}$$

导前微分双回路控制系统分析

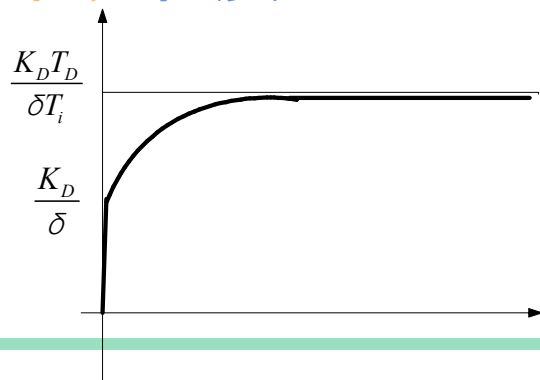


1. 导前微分控制系统的等效串级控制系统

等效副调节器特性： $W_{T2}(s) = W_T(s) \cdot W_D(s) = \frac{1+T_i s}{\delta T_i s} \cdot \frac{K_D \cdot T_D \cdot s}{1+T_D s}$

$$= \frac{K_D \cdot T_D}{\delta T_i} \left[\frac{\frac{T_i}{T_D} (1+T_D s) + 1 - \frac{T_i}{T_D}}{1+T_D s} \right] = \frac{K_D}{\delta} \left(1 + \frac{\frac{T_D}{T_i} - 1}{1+T_D s} \right)$$

若 $T_D > T_i$ ，等效副调节器有比例积分性质：



$$W_{T2}(s) = \frac{K_D}{\delta} \left(1 + \frac{\frac{T_D}{T_i} - 1}{1+T_D s} \right) = \frac{K_D}{\delta} \left(1 + \frac{\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_D}}{\frac{1}{T_D} + s} \right)$$
$$\approx \frac{K_D}{\delta} \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

导前微分双回路控制系统分析

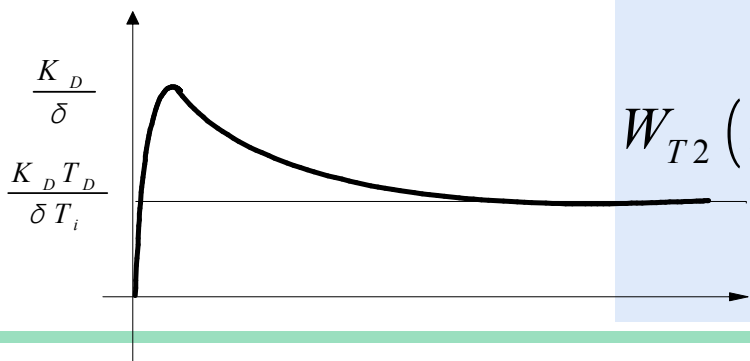


1. 导前微分控制系统的等效串级控制系统

等效副调节器特性： $W_{T2}(s) = W_T(s) \cdot W_D(s) = \frac{1+T_i s}{\delta T_i s} \cdot \frac{K_D \cdot T_D \cdot s}{1+T_D s}$

$$= \frac{K_D \cdot T_D}{\delta T_i} \left[\frac{\frac{T_i}{T_D} (1+T_D s) + 1 - \frac{T_i}{T_D}}{1+T_D s} \right] = \frac{K_D}{\delta} \left(1 + \frac{\frac{T_D}{T_i} - 1}{1+T_D s} \right)$$

若 $T_D < T_i$ ，等效副调节器有比例微分性质：



$$W_{T2}(s) = \frac{K_D T_D}{\delta T_i} \cdot \frac{1+T_i s}{1+T_D s} = \frac{K_D T_D}{\delta T_i} \left(1 + \frac{T_i s - T_D s}{1+T_D s} \right) = \frac{K_D T_D}{\delta T_i} \left(1 + \frac{\left(1 - \frac{T_D}{T_i}\right) s}{1+T_D s} \right)$$

导前微分双回路控制系统分析



东南大学
能源与环境学院
seu school of energy and environment

1. 导前微分控制系统的等效串级控制系统

等效副调节器特性： $W_{T2}(s) = W_T(s) \cdot W_D(s) = \frac{1+T_i s}{\delta T_i s} \cdot \frac{K_D \cdot T_D \cdot s}{1+T_D s}$

$$= \frac{K_D \cdot T_D}{\delta T_i} \left[\frac{\frac{T_i}{T_D} (1+T_D s) + 1 - \frac{T_i}{T_D}}{1+T_D s} \right] = \frac{K_D}{\delta} \left(1 + \frac{\frac{T_D}{T_i} - 1}{1+T_D s} \right)$$

若 $T_D = T_i$ ，等效副调节器有比例性质：

$$W_{T2}(s) = \frac{K_D}{\delta}$$

一般 $T_D > T_i$ ，所以 $W_{T1}(s)$ 基本上是PI规律。

导前微分双回路控制系统分析



東南大學
能源与环境学院
seu school of energy and environment

1. 导前微分控制系统的等效串级控制系统

导前微分控制系统可以等效为主、副调节器都为PI控制规律的串级控制系统，因此具有很强的克服内扰能力。

从以上推导也可以看出：
只有当串级控制中的主调节器为PID时，其性能才优于导前微分双回路控制系统

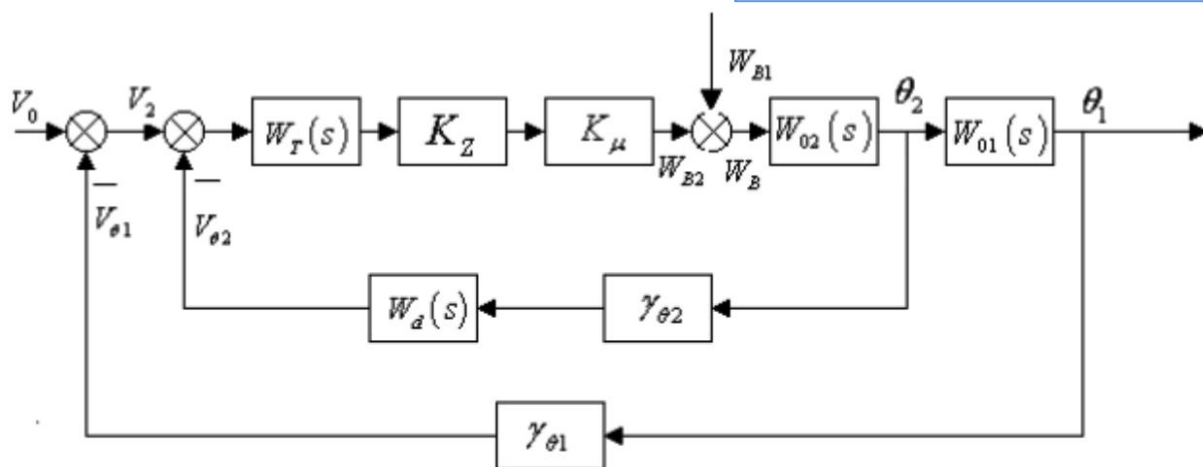
导前微分双回路控制系统分析



2. 加入导前微分信号改善控制对象动态特性

控制对象 $W_0(s)$
延迟、惯性大

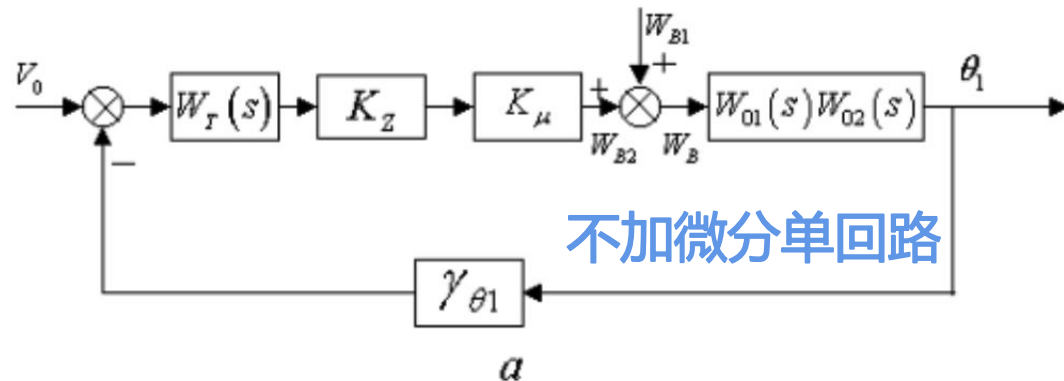
$$W_0(s) = [W_{01}(s)W_{02}(s)]$$



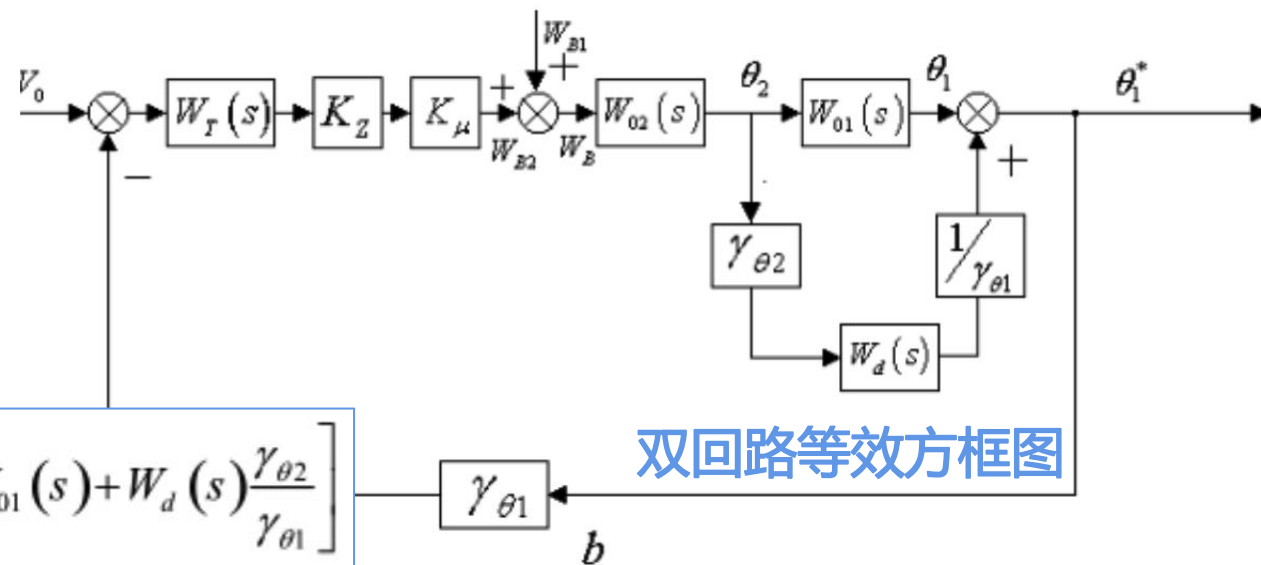
导前微分双回路控制系统

并联微分信号，改善
控制对象动态特性

$$W_0^*(s) = \frac{\theta_1^*(s)}{W_B(s)} = W_{02}(s) \left[W_{01}(s) + W_d(s) \frac{\gamma_{\theta 2}}{\gamma_{\theta 1}} \right]$$



不加微分单回路



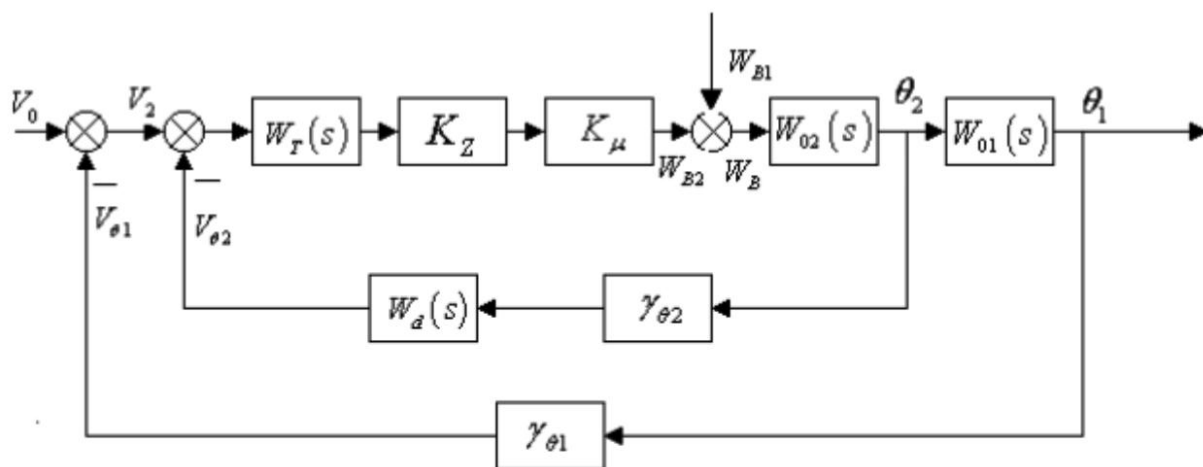
双回路等效方框图

导前微分双回路控制系统分析



东南大学
能源与环境学院
seu school of energy and environment

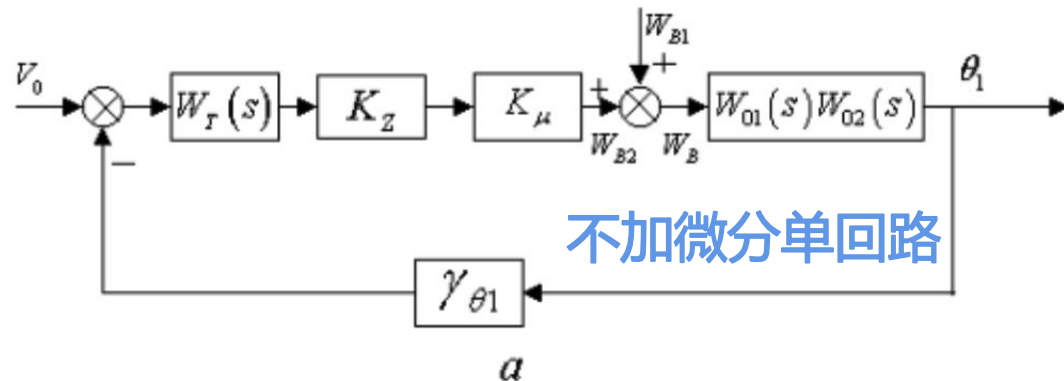
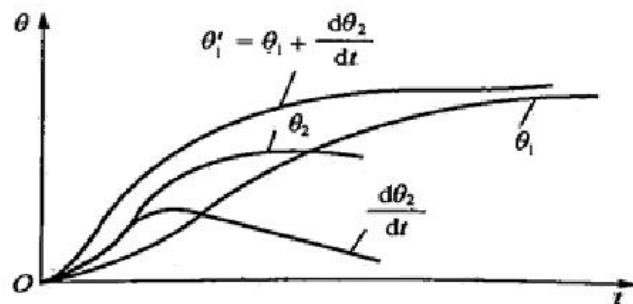
2. 加入导前微分信号改善控制对象动态特性



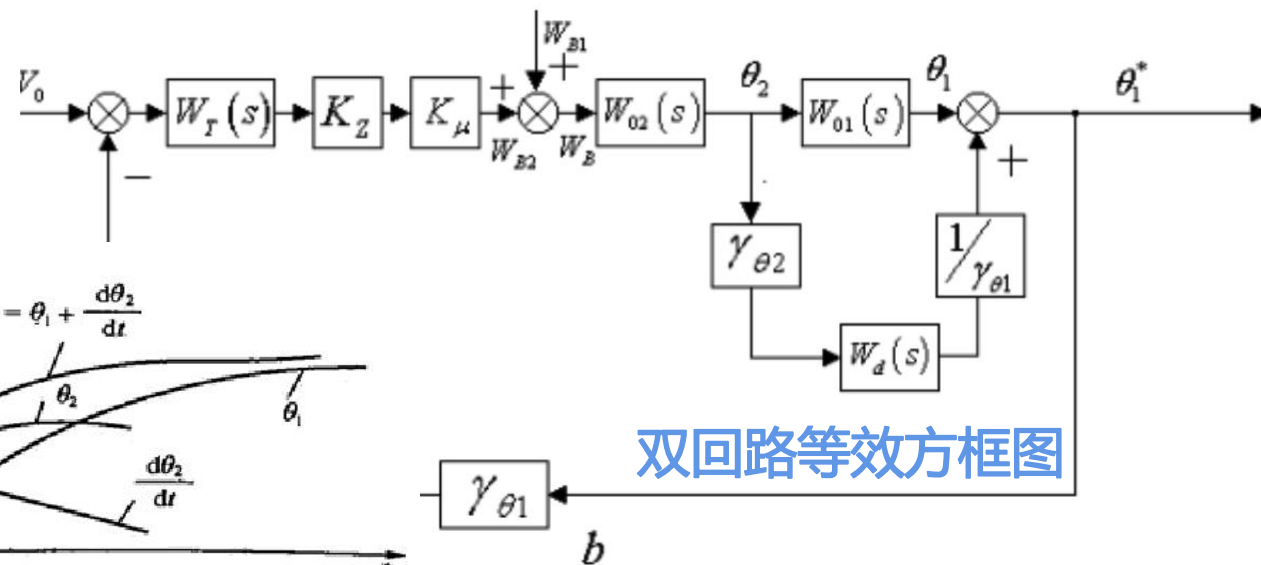
导前微分双回路控制系统

等效输出信号(动态), 迟延、惯性减小

$$\theta_1^* = \theta_1 + \frac{d\theta_2}{dt} \frac{\gamma_{\theta 2}}{\gamma_{\theta 1}}$$



不加微分单回路



双回路等效方框图

导前微分双回路控制系统参数整定



東南大學
能源与环境学院
seu school of energy and environment

1. 等效串级控制系统->串级系统整定方法

2. 等效对象->补偿法，单回路整定方法

若使用PI调节器，需要整定的参数有：

K_D 、 T_D 、 δ 、 T_i

导前微分双回路控制系统参数整定



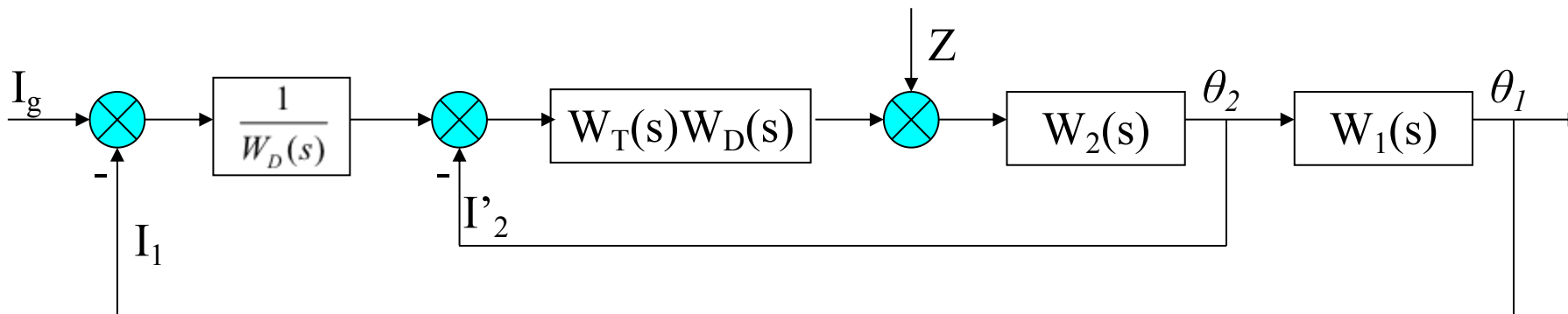
东南大学
能源与环境学院
seu school of energy and environment

1. 等效串级系统，主、副调节器可分别独立整定

注：

满足独立整定条件

先整定主调节器 ($1/W_D(s)$)



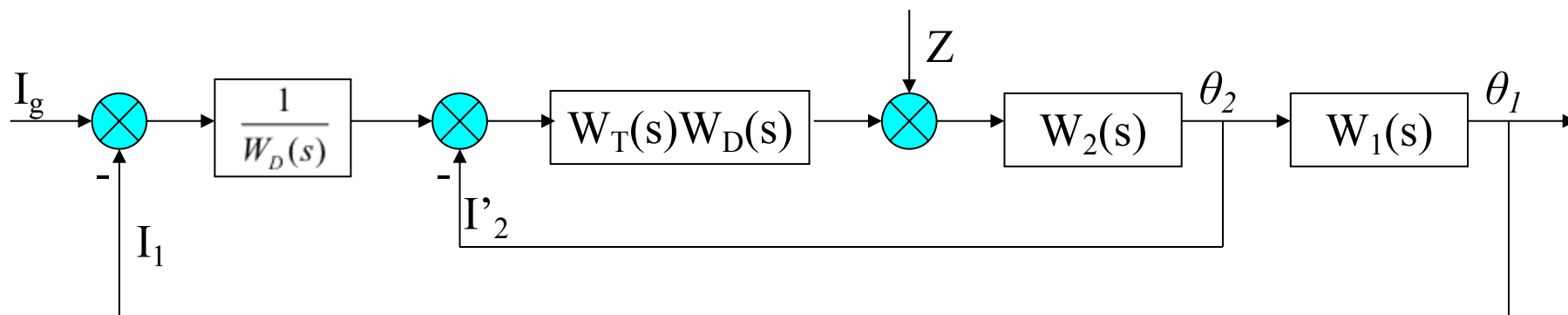
导前微分双回路控制系统参数整定



1. 等效串级系统，主、副调节器可分别独立整定

主调节器：

单回路整定方法，先确定 K_D , T_D ，然后整定副调节器。



$$W_{T1}(s) = \frac{1}{W_D(s)} = \frac{1 + T_D s}{K_D \cdot T_D \cdot s} = \frac{1}{K_D} \left(1 + \frac{1}{T_D s} \right) = \frac{1}{\delta_1} \left(1 + \frac{1}{T_{i1} s} \right)$$

$$\begin{aligned} \delta_1 &= K_D \\ T_{i1} &= T_D \end{aligned}$$

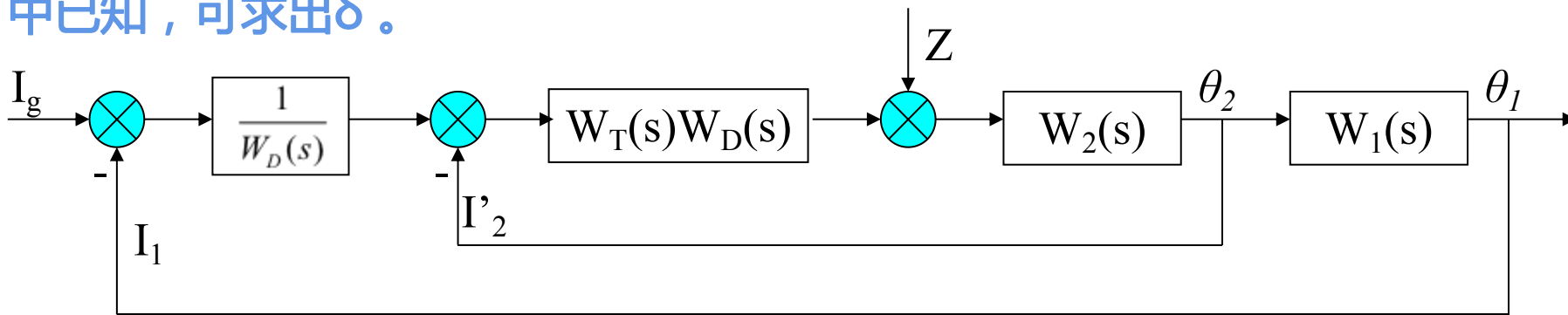
导前微分双回路控制系统参数整定



1. 等效串级系统，主、副调节器可分别独立整定

副调节器：

主回路开路，单回路整定方法，求出 K_D/δ 和 T_i ， K_D 在主调节器整定中已知，可求出 δ 。



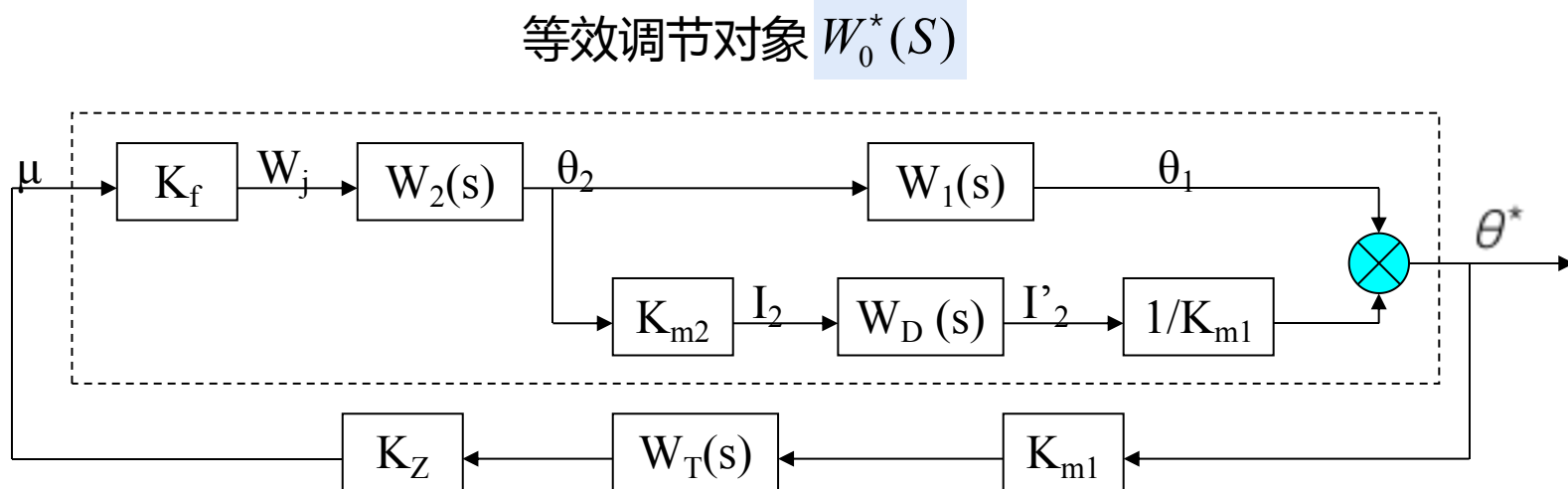
$$W_{T2}(s) = \frac{K_D}{\delta} \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

导前微分双回路控制系统参数整定



东南大学
能源与环境学院
seu school of energy and environment

2. 补偿法整定导前微分系统



为使导前微分控制系统具有良好的控制品质，希望等效对象 $W_0^*(S)$ 特性接近导前区的特性。

导前微分双回路控制系统参数整定



东南大学
能源与环境学院
seu school of energy and environment

2. 补偿法整定导前微分系统

等效对象特性

$$W_0^*(s) = \frac{\theta^*(s)}{\mu(s)} = K_f \cdot W_2(s) \left[W_1(s) + \frac{K_{m2}}{K_{m1}} W_D(s) \right]$$

补偿原则

$$K_f \cdot \frac{K_0}{K_2} \cdot W_2(s) = K_f \cdot W_2(s) \left[W_1(s) + \frac{K_{m2}}{K_{m1}} W_D(s) \right]$$

整理，得

$$W_D(s) = \frac{K_{m1}}{K_{m2}} \left[\frac{K_0}{K_2} - W_1(s) \right]$$

实际上，往往不易测取 $W_1(s)$ 传递函数，而只能测得 $W_2(s)$ 和 $W_0(s)$ 飞升特性曲线。

导前微分双回路控制系统参数整定



2. 补偿法整定导前微分系统

(1) 完全补偿 ($n_1=1$)

$$\frac{K_D T_D s}{1 + T_D s} = K_1 \left[1 - \frac{1}{(1 + T_1 s)^{n_1}} \right] \frac{K_{m1}}{K_{m2}}$$

$$\frac{K_D T_D s}{1 + T_D s} = \frac{K_1 T_1 s}{1 + T_1 s} \cdot \frac{K_{m1}}{K_{m2}}$$

对应项相等原则：

$$T_D = T_1$$
$$K_D = K_1 \cdot \frac{K_{m1}}{K_{m2}}$$

导前微分双回路控制系统参数整定



東南大學
能源与环境学院
seu school of energy and environment

2. 补偿法整定导前微分系统

(2) 近似补偿 ($n_1 > 1$)

补偿原理公式两边分别展开成级数, 比较同阶项

$$\frac{K_D T_D s}{1 + T_D s} = K_D T_D s (1 - T_D s + T_D^2 s^2 - \dots)$$

$$K_1 \left[1 - \frac{1}{(1 + T_1 s)^{n_1}} \right] \frac{K_{m1}}{K_{m2}} = K_1 \left[n_1 T_1 s - 0.5 n_1 (n_1 + 1) T_1^2 s^2 + \dots \right] \frac{K_{m1}}{K_{m2}}$$

$$\begin{cases} K_D T_D = n_1 T_1 K_1 \cdot \frac{K_{m1}}{K_{m2}} \\ K_D T_D^2 = 0.5 n_1 (n_1 + 1) T_1^2 \cdot \frac{K_{m1}}{K_{m2}} \cdot K_1 \end{cases}$$

解得

$$T_D = 0.5 (n_1 + 1) T_1$$

$$K_D = \frac{2 n_1}{n_1 + 1} \cdot \frac{K_{m1}}{K_{m2}} \cdot K_1$$

导前微分双回路控制系统参数整定



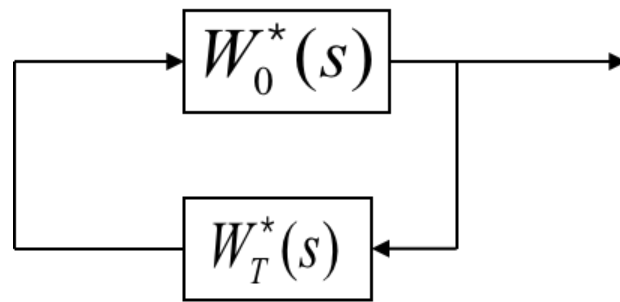
東南大學
能源与环境学院
seu school of energy and environment

2. 补偿法整定导前微分系统

(2) 近似补偿 ($n_1 > 1$)

$$W_T^*(S) = W_T \cdot K_z \cdot K_{m1} = \frac{K_z \cdot K_{m1}}{\delta} \left(1 + \frac{1}{T_i S} \right) = \frac{1}{\delta^*} \left(1 + \frac{1}{T_i S} \right)$$

$$\delta^* = \frac{\delta}{K_2 \cdot K_{m1}} \quad T_i^* = T_i$$



导前微分双回路控制系统参数整定



東南大學
能源与环境学院
seu school of energy and environment

2. 补偿法整定导前微分系统

- 1) 根据主汽温和导前汽温在阀门扰动下的阶跃响应曲线，用两点法或切线法求出主汽温和导前汽温对象的参数 n_0 、 T_0 、 K_0 和 n_2 、 T_2 、 K_2 ；
- 2) 由公式求出惰性区参数 n_1 ， T_1 ， K_1 ；
- 3) 根据补偿原理，由公式求出微分器的参数 T_D ， K_D ；
- 4) 根据等效对象特性 $W_0^*(s)$ ，用动态参数法求取调节器的参数 δ 和 T_1 。

思考题



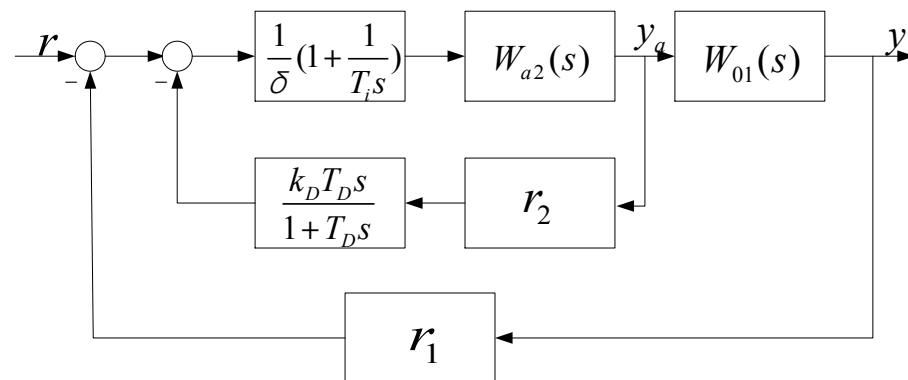
東南大學
能源与环境学院
seu school of energy and environment

1. 对于采用导前微分信号的双回路系统，当调节结束时能否保证被调量等于给定值？为什么？
2. 采用导前微分信号的双回路系统有哪几种整定方法？写出其过程。
3. 补偿法整定调节器参数步骤是什么？等效对象是如何选取的？
4. 图示说明导前微分系统为什么相当于改善了对对象动态特性。
5. 说明导前微分系统为什么可以减小动态偏差，改善控制品质。
6. K_D 是如何影响内、外回路的稳定性的？在工程上如何调整 K_D ？

思考题



系统如下图所示



已知系统满足内外回路独立整定条件，且按一定 Ψ ，整定了 δ 、 T_i 、 K_D 和 T_D 。现由于某种原因要提高主回路的稳定性，而保持副回路 Ψ 不变，问 δ 、 K_D 应如何变？为什么？

注：将系统等效成串级系统，副调节器 $W_{a2}^*(s) \approx \frac{K_D}{\delta} (1 + \frac{1}{T_i s})$

主调节器 $W_{a1}^*(s) = \frac{1}{K_D} (1 + \frac{1}{T_D s})$ ——P2调节器，要提高稳定性，须减小

比例作用，即增大 K_D ；要保持副回路 Ψ 不变，应使 δ 随 K_D 增大，副调节器的比例系数 $\frac{K_D}{\delta}$ 不变。